

太湖流域丘陵地区暴雨条件下农田氮素 随地表径流迁移特征

李瑞玲¹, 张永春², 曾 远², 刘 庄², 颜润润³

(1.河海大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210098; 2.环境保护部南京环境科学研究所, 江苏 南京 210042; 3.江苏省环境科学研究院, 江苏 南京 210036)

摘 要: 通过流量和水质的同步监测, 在流域尺度上研究了暴雨对农田氮素随地表径流迁移的影响。结果表明, 次降雨量介于 69.85~110.8 mm 及降雨历时持续 7.5 h 以上的暴雨过程, 流域出口处径流过程线一般呈单峰形态, 径流峰值滞后于最大降雨强度, 但滞后时间受降雨条件影响存在较大差异; 流域 3 次暴雨事件的综合径流系数达 0.305; 总氮迁移量介于 651.5~858.4 g·hm⁻², 其中硝氮与氨氮是氮素迁移的主要类型, 平均输出负荷分别为 303.7 和 270.0 g·hm⁻², 占总氮的 41.9% 和 37.2%, 亚硝态氮迁移量最小, 仅占总氮的 3.3%; 溶解态氮是氮素迁移的主要形态, 其迁移量介于 579.1~582.2 g·hm⁻², 与悬浮态氮输出比为 3.2:1。氨氮以悬浮态迁移为主, 但受施肥状况影响较大。

关键词: 地表径流; 暴雨; 农田氮素; 太湖流域; 迁移

中图分类号: X522 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2009)06-1185-06

Effects of Rainstorm on the Export of Farmland Nitrogen with Surface Runoff in Hilly Area of Tai Lake Basin

LI Rui-ling¹, ZHANG Yong-chun², ZENG Yuan², LIU Zhuang², YAN Run-run³

(1.College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2.Nanjing Institute of Environmental Science, MEP, Nanjing 210042, China; 3.Environmental Science Research Institute of Jiangsu Province, Nanjing 210036, China)

Abstract: In this study, watershed scale experiments were conducted to study the characteristics of nitrogen losses with surface runoff from farmlands under rainstorm conditions in hilly areas around Tai Lake. Results showed that the change of surface runoff hydrographs usually appeared in single-peak form. Generally, the peak of surface runoff lagged behind the maximum intensity of rainfall, but the delay time had big differences because of the different rainfall conditions. when precipitation was within 69.85~110.8 mm and lasted more than 7.5 h, the runoff coefficient was 0.305 in Meilin catchment. Effects of rainstorm on the export of farmland nitrogen with surface runoff mainly presented as incipient scour and accumulation in later period. During the initial stage of surface runoff, the concentration of TN was relatively high and decreased as a hackly shape. At the later stage, the concentration of TN increased differently. At the same time, changes of the concentration of nitrate nitrogen, ammoniacal nitrogen and nitrite nitrogen in runoff indirectly reacted their conversions in farmland ditch and river channel. Under rainstorm conditions, the transport fluxes of TN was within 651.5~858.4 g·hm⁻² and the average transport fluxes of nitrate nitrogen, ammonia nitrogen and nitrite nitrogen was 303.7, 270.0 g·hm⁻² and 50.0 g·hm⁻², which accounted for 41.9%, 37.2% and 3.3% of total nitrogen respectively. Dissolved nitrogen was the main export form of nitrogen within 579.1~582.2 g·hm⁻². And dissolved nitrate nitrogen was the main export form of dissolved nitrogen which accounted for 31.7%. Due to adherence to soil particle, the losses of ammonia nitrogen were particularly in suspended state and were affected by different fertilizer applications.

Keywords: surface runoff; rainstorm; farmland nitrogen; Tai Lake basin; transport

氮是农田生产力的主要限值因素之一^[1], 氮肥的施用可获得明显的增产效果, 同时氮素又可随降雨引

起的地表径流等各种方式进入水体, 形成农业非点源污染, 导致受纳水体富营养化等诸多环境问题。研究表明, 苏南太湖流域氮对地表水的污染负荷量高达 2.5×10⁴ t·a⁻¹, 占氮素化肥施用量的 16.8%。太湖、滇池和巢湖面源污染物对全氮的贡献率达 59%、33% 和 63%^[2], 其中农业面源污染问题更显突出, 已成为水体富营养化最主要的污染源^[3]。

收稿日期: 2008-10-20

基金项目: 江苏省太湖水污染治理科技专项“太湖流域江苏地区面源污染负荷计算与模拟研究”(BK2007731)

作者简介: 李瑞玲(1983—), 女, 河北邢台人, 硕士研究生, 主要研究方向为面源污染、水环境综合整治。E-mail: lrl198389@eyou.com

太湖流域属亚热带季风气候区,降雨量季节变化明显,雨量分配不均。夏秋两季降雨量占全年降雨量的 50%以上,主要集中在 6—7 月的梅雨期和 8—9 月的台风雨期。这两段时间不仅暴雨事件频发,而且正是农田翻耕、播种和施肥等农事活动十分集中的季节,二者在时间上的耦合必然会对农业非点源污染物的输出产生深刻的影响^[4],主要表征为强降雨过程中含有巨大能量的雨滴对富集大量化肥的表土进行反复冲击,使得土壤中的可溶态养分大量进入液相并随地表径流进入受纳水体,造成水体污染。然而,关于该流域暴雨条件下的农田污染物随地表径流的迁移特征鲜有报道。目前定量研究农田氮素迁移特征主要有以下两种方法^[5]:①在河道上布设水质监测点,通过分析河道水质变化间接反映农田氮素迁移特征^[6]。②在人工降雨或自然降雨条件下,通过水质水量同步监测进行研究^[7-9]。基于自然降雨条件下的野外原位试验,由于试验条件更接近真实环境,试验结果能更准确地反映农田氮素经产、汇、集流的最终迁移特征。本文通过在太湖流域宜兴梅林小流域进行野外原位试验,揭示了暴雨条件对氮素随地表径流迁移及输出特征的影响。

1 研究区域与研究方法

1.1 流域概况

梅林小流域位于宜兴市东南(31°20'N,119°51'E),面积 122 hm²,距太湖约 9 km,属典型的太湖丘陵小流域。流域边界清楚,可分为头坳和二坳两个子流域,头坳子流域 73.7 hm²,二坳子流域 48.3 hm²,海拔落差超过 50 m。该地区全年温暖湿润,年均降雨量 1 150 mm,年平均气温 15.5 ℃。土地利用类型多样,除了海拔较高的山坡被大片的松林和竹林覆盖外,主要土地类型有水稻田、旱地、菜地、板栗林、茶园和梨园等(表 1)。土壤为红黄壤(旱地)和水稻土。氮肥平均年施肥水平为 716.0 kgN·hm⁻²。本研究全部在头坳子流域进行。

1.2 研究方法

1.2.1 流域出口布设

在流域出口断面设置矩形堰和降雨流量自动采

样仪。矩形堰宽 2 m,表面平整光滑,以确保水的流态不会发生大的变化。流量自动采样仪记录降雨量、水位过程和采集水样。由于流域内无任何工业污染源,居住人口很少,流域出口断面的水质状况可以代表该地区的农田面源污染特征。根据堰流量公式计算出口断面流量。

1.2.2 研究方法

通过分析流域一次降雨全过程的降雨、径流、水质的同步观测资料,研究地表径流迁移过程,得出暴雨条件下次降雨综合径流系数;分析自然施肥条件下强降雨过程中氮素随径流过程的迁移特征,找出主要输出类型和形态,为优化农事活动管理措施,减少农业非点源污染物的输出提供科学依据。

1.2.3 采样及分析方法

当降雨量超过 10.2 mm 时流量自动采样仪触发启动,记录水位过程和采集水样。水位记录时间间隔为 5 min,水样采集整个径流过程,产流初期采集过程密集,间隔为 5 min,中期为 10 min,后期为 15 min,当降雨时间较长时采样间隔做适当调整。水样采集后冷冻保存,并尽快送到实验室测定。

于 2004—2007 年期间,收集了 3 场暴雨事件的径流样本,分别为 2004 年 6 月 23 至 25 日,2006 年 7 月 5 日和 2007 年 7 月 10 日,编号为 040624、060705 和 070710 事件。水样测定 TN、NH₃-N、NO₃-N 和 NO₂-N 含量,经 0.45 μm 滤膜过滤后,测定溶解态氮含量,各形态氮素含量与相应溶解态氮之差为悬浮态氮含量。水样各氮素指标测定方法:TN 采用过硫酸钾氧化,紫外分光光度法测定,NH₃-N、NO₃-N 和 NO₂-N 的测定分别采用纳氏比色法、酚二磺酸法和 N-(1-萘基)乙二胺光度法。

2 结果分析与讨论

2.1 暴雨条件下降雨径流过程分析

径流过程线的形状受降雨条件影响较大,其形状随着降雨过程等影响因素的不同而不同。由 3 次暴雨事件径流过程线可知(图 1):(1)径流峰值出现在最大降雨强度后,约 80~345 min 不等。一般情况下,降雨集中的强降雨过程径流峰值出现较早。040624 事件

表 1 梅林头坳小流域土地利用分布

Table 1 Land use in Meilin catchment

土地利用类型	竹林	旱地	林地	稻田	板栗林	果园	草地	水塘	菜地	居民地
面积比/%	21.6	21.1	11.7	10.4	15.6	7.9	6.0	2.5	1.7	1.6

中,降雨历时 970 min,降雨量 69.85 mm,其径流量在第一个降雨峰值 $1.47 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 过后 345 min 达到最大响应值。070710 事件降雨历时为 450 min,次降雨量达 72.5 mm,最大降雨强度出现 80 min 后径流量即达到最大值。(2)径流过程线一般呈单峰形态,且涨水段上升较快,退水段下降较慢,稳定后径流量仍维持在较高的水平。040624 事件中径流过程线呈多峰形态,调查发现 2004 年 6 月 15 日与 18 日产生 53.8 mm 与 12.2 mm 的降雨,短时间内的连续降雨造成较高的土壤前期含水率以及地下水位,强降雨事件再次发生时,导致流域快速产流,并使流域中的饱和产流面积逐渐扩张,滞后的壤中流和地下流与蓄满产流形成第二次较大的流量响应。(3)暴雨条件下径流系数往往要高于小雨、中雨或大雨情况,040624、060705 和 070710 事件径流系数分别为 0.318、0.257 和 0.341,综合径流系数达 0.305。

2.2 暴雨条件下氮素迁移特征分析

2.2.1 氮素随径流过程迁移分析

由农田氮素浓度随时间变化过程可知(图 2),暴

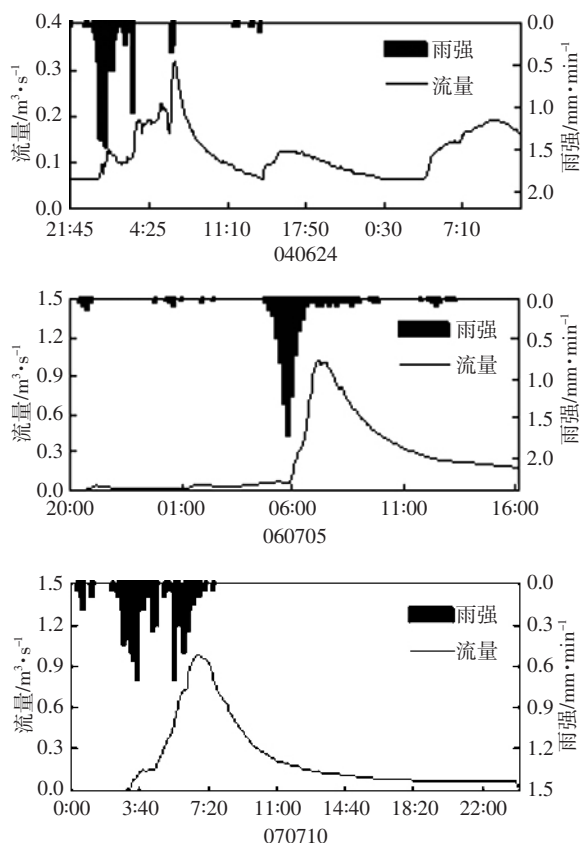


图 1 梅林小流域暴雨条件下径流过程线

Figure 1 Variation of surface runoff hydrographs under rainstorm in Meilin catchment

雨对农田氮素迁移的影响主要表现为初期冲刷与后期累加效应。涨水段, TN 浓度在径流初期相对较高, 随降雨径流过程的延续, 其浓度呈波浪形下降; 退水段, TN 浓度逐渐趋于稳定, 最后存在不同程度的上升。这是因为, 径流初期, 降水的浸提作用占主要地位, 从而浓度相对较高, 一段时间后, 降水的浸提作用和稀释作用交互进行, 稀释作用逐渐占主导地位, 从而浓度降低^[10]。径流后期, 地表径流量逐渐减小, 加上滞后的壤中流, 使氮素浓度出现不同程度的上升。

硝氮与氨氮浓度变化与总氮相似, 但初期浓度水平存在较大差异。040624 与 070710 事件中硝氮浓度略高于氨氮, 而 060705 事件中氨氮浓度远远大于硝氮。调查发现 2006 年 6 月该流域内施用了大量的碳

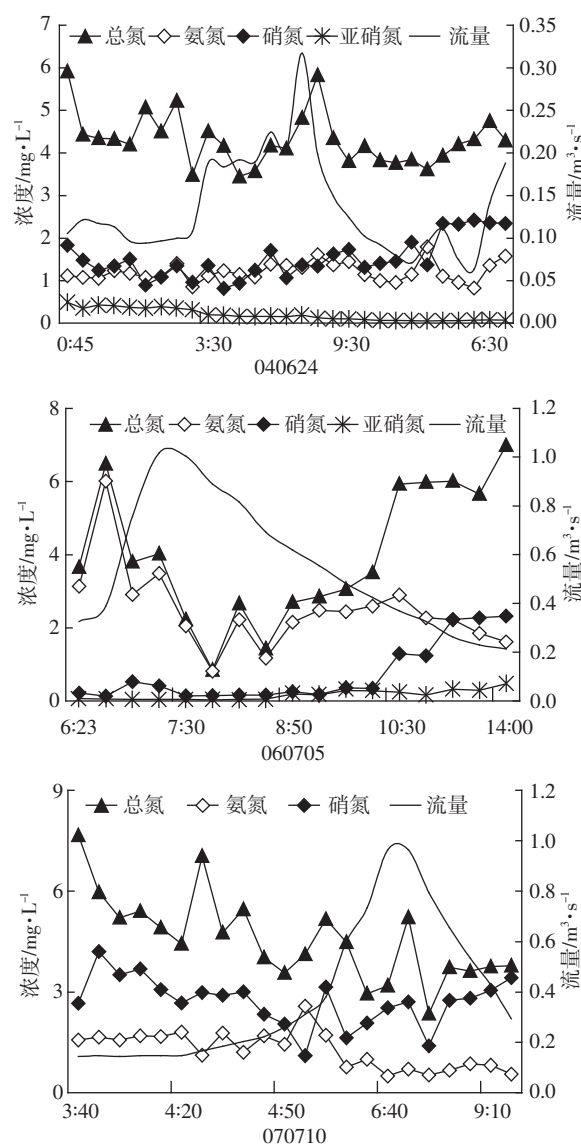


图 2 氮素浓度随地表径流失过程

Figure 2 Variation of nitrogen concentration carried by surface runoff

铵与尿素,造成氨氮浓度大大增加。亚硝态氮含量最少,且随径流过程逐渐下降,040624 事件中亚硝态氮浓度输出仅占 TN 的 0.7%~9.4%。

图 2 中还可发现,硝氮与氨氮浓度呈现此消彼长,此长彼消的过程。这是由于以流域尺度为监测区域综合反应了农田产流和沟渠汇流状况,也间接反应出各氮素间的转化。土壤及水体中氮的存在形式主要为有机氮和无机氮,在有氧水环境中有机氮通过矿化作用及泥沙中氮的扩散使水体中 NH_4^+ 含量增加,而当 NH_4^+ 转化为 NO_2^- 时, NH_4^+ 的含量减少, NO_2^- 的含量增加; NO_2^- 被转化为 NO_3^- 时, NO_2^- 的含量减少, NO_3^- 的含量增加。 NO_3^- 与 NO_2^- 在厌氧条件下又可以通过反硝化作用转化为 NH_4^+ 。 NH_4^+ 、 NO_3^- 与 NO_2^- 三者之间互相协助互相制约,呈现出此消彼长、此长彼消的规律。研究发现 NO_2^- 被转化为 NO_3^- 的速度远比 NH_4^+ 转化为 NO_2^- 的速度快,所以水中 NO_2^- 的含量很少^[11]。

2.2.2 氮素迁移类型分析

次降雨径流平均浓度^[5](event mean concentration, EMC) 定义为污染物瞬时浓度的流量加权平均值^[12],反映某场降雨地表径流中的污染物平均浓度。迁移量指随地表径流迁移的单位面积污染物流失量。对比分析各氮素的 EMC 值和迁移量有利于确定氮素输出的主要类型和主导因素。由图 3 三次暴雨事件的 EMC 值箱图可知,总氮 EMC 中位值最大,为 $3.82 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,且变化幅度较小。硝氮与氨氮是氮素迁移的主要类型,其 EMC 中位值分别占总氮的 48% 和 33%,最大值达 2.45 和 $2.32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,最小值为 0.71 和 $0.82 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,变化幅度较大。亚硝氮 EMC 中位值最小,仅为 $0.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,占总氮的 4%。

由表 2 各类型氮素迁移量分布发现,在降雨量为 69.85~110.8 mm 暴雨事件中总氮迁移量最大,介于

651.5~858.4 $\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$,其次为硝氮、氨氮和亚硝氮。硝氮与氨氮的平均迁移量为 303.7 和 $270.0 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$,分别占总氮的 41.9% 与 37.2%。亚硝氮平均迁移量最小,仅占总氮的 3.4%。由于降雨之前碳铵与尿素等氮肥的大量使用,060705 事件中氨氮迁移量达 $416.51 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$,远远大于硝氮迁移量。对 3 次暴雨事件过程中总氮与硝氮及总氮与氨氮的迁移通量分别做回归分析,发现在 $P < 0.001$ 水平下,总氮与硝氮的决定系数 R^2 介于 0.901~0.997,总氮与氨氮的决定系数 R^2 介于 0.959~0.999 之间,说明硝氮与氨氮是造成总氮迁移量变化的主要原因。表 1 中还可发现,总氮迁移量与径流深有较好的相关性。

表 2 氮素迁移量分布

Table 2 Distribution of transport fluxes of nitrogen

事件	径流深/mm	迁移量/ $\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$			
		总氮	硝氮	氨氮	亚硝氮
040624	20.09	858.42	365.91	252.64	22.79
060705	17.98	666.24	126.53	416.51	27.18
070710	17.08	651.49	418.66	140.72	—
均值	18.83	725.38	303.70	269.96	24.98

2.2.3 氮素迁移形态分析

径流迁移主要有两种形态:(1)悬浮态流失,即污染物结合在悬浮颗粒上,随土壤流失进入水体。(2)溶解态流失,即水溶性较强的污染物被淋洗而进入径流。分析氮素的输出形态,不仅有利于对农业非点源污染的控制,也可以明确氮素污染主要以何种形态进入受纳水体,对水体污染控制有重大意义。梁涛等^[13]在太湖西苕溪流域人工暴雨条件下研究氮元素的输移,结果显示悬浮颗粒态氮的迁移通量都远高于溶解态氮,占总氮的 70%~90%,黄金良等^[14]对九龙江流域地表径流氮磷流失特征分析,研究得出暴雨事件下农业汇水区地表径流氮输出以水溶态为主,可见不同的流域氮素的主要流失形态也不同。

由图 4 氮素迁移形态特征可知,暴雨条件下总氮、硝氮与亚硝氮主要以溶解态迁移,氨氮主要以悬浮颗粒态迁移。040624 与 060705 事件中,溶解态总氮平均迁移量为 $580.6 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$,是悬浮态总氮的 3.2 倍。硝氮与亚硝氮由于性质不稳定及施肥状况等因素的影响,迁移量变化幅度较大,其中溶解态硝氮迁移量介于 $79.4 \sim 288.5 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$,是悬浮态硝氮的 1.7~3.7 倍,溶解态亚硝氮迁移量最小,仅占溶解态总氮的 2.7%~3.7%。040624 事件中悬浮态氨氮迁移量为

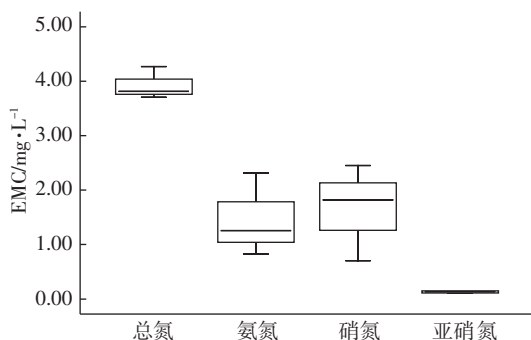


图 3 3 次暴雨事件中氮素 EMC 值箱图

Figure 3 Boxplot of EMC value of nitrogen under three rainstorm conditions

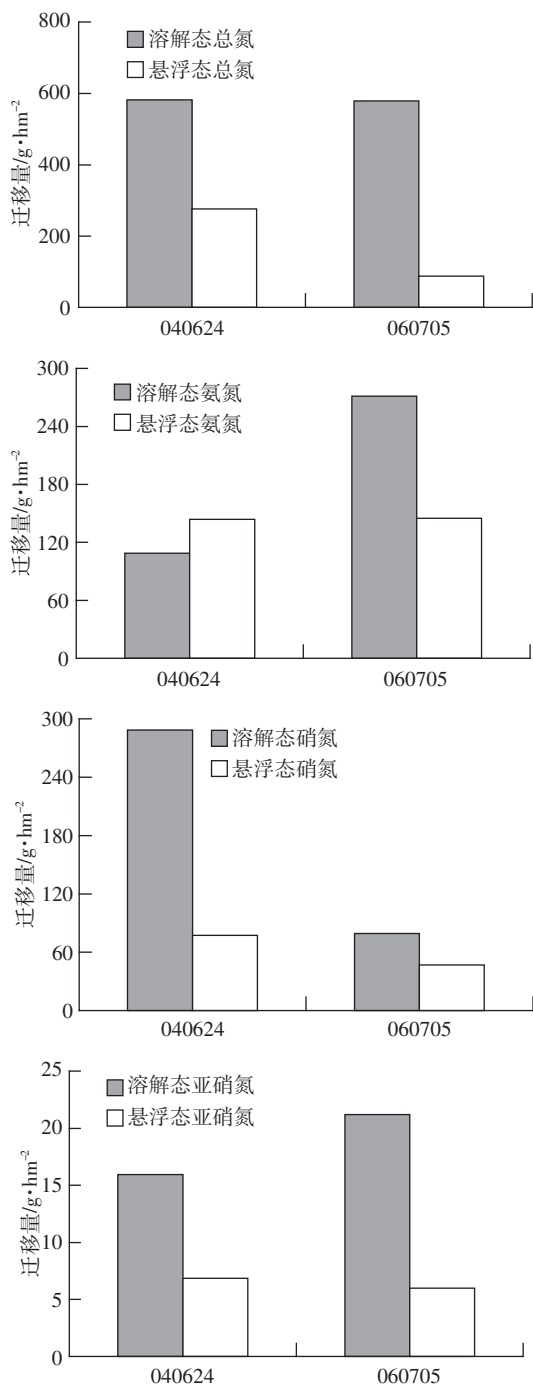


图4 溶解态和悬浮态氮素迁移量分布

Figure 4 Distribution of transport fluxes of dissolved and suspended nitrogen carried by surface runoff

143.78 g·hm⁻², 大于溶解态氨氮迁移量 108.86 g·hm⁻², 造成这种现象的原因在于土壤颗粒和土壤胶体对铵离子都具有很强的吸附作用, 使得大部分可交换性铵得以保存在土壤中, 以颗粒态流失^[15]。060705 事件中, 由于降雨前施用易溶于水的碳铵, 导致溶解态氨氮迁移量大大增加。

3 结论

(1) 原位野外实验表明, 暴雨条件下径流过程线既存在共性又存在差异。径流过程线一般呈单峰形态, 其峰值一般出现在最大降雨强度后, 但出现时间因降雨条件存在较大差异。该流域 3 次暴雨事件的综合径流系数达 0.305。

(2) 暴雨对农田氮素迁移的影响主要表现为初期冲刷与后期累加效应。径流初期总氮浓度相对较高, 并随径流过程呈锯齿状下降; 径流后期总氮浓度存在不同程度的上升。以流域尺度为研究单元的氮素径流过程不仅可以反映农田降雨产污, 也反应出沟渠河道中各氮素间的转化。

(3) 降雨量为 69.85~110.8 mm 暴雨事件中, 氮素迁移负荷介于 651.5~858.4 g·hm⁻², 硝氮与氨氮是氮素随地表径流迁移的主要类型, 平均输出为 303.7 和 270.0 g·hm⁻², 占总氮输出的 41.9% 和 37.2%。

(4) 溶解态氮是氮素迁移的主要形态, 040624 与 060705 两次暴雨事件中, 溶解态总氮迁移量为 1 161.2 g·hm⁻², 占总氮输出的 76.2%, 是悬浮态氮输出的 3.2 倍。暴雨条件下氨氮以悬浮态迁移为主, 但受施肥状况影响较大。

参考文献:

- [1] 李强坤, 李怀恩, 胡亚伟, 等. 青铜峡灌区氮素流失试验研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(2): 683-686.
LI Qiang-kun, LI Huai-en, HU Ya-wei, et al. Nitrogen loss in Qingtongxia irrigation area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(2): 683-686.
- [2] 朱兆良, 孙波, 杨林章, 等. 我国农业面源污染的控制政策和措施[J]. 农业, 2005, 23(4): 47-51.
ZHU Zhao-liang, SUN Bo, YANG Lin-zhang, et al. Policy and countermeasures to control non-point pollution of agriculture in China[J]. *Agriculture*, 2005, 23(4): 47-51.
- [3] 张永春, 张毅敏, 胡孟春, 等. 平原河网地区面源污染控制的前置库技术研究[J]. 中国水利, 2006, 17: 14-18.
ZHANG Yong-chun, ZHANG Yi-min, HU Meng-chun, et al. Studies on front damming technology for NPS pollution control of river network in plain areas[J]. *China Water Resources*, 2006, 17: 14-18.
- [4] 高超, 朱继业, 朱建国, 等. 极端降水事件对农业非点源污染物迁移的影响[J]. 地理学报, 2005, 60(6): 991-997.
GAO Chao, ZHU Ji-ye, ZHU Jian-guo, et al. Effects of extreme rainfall on the export of nutrients from agricultural land[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(6): 991-997.
- [5] 王鹏, 高超, 姚琪, 等. 太湖丘陵地区农田氮素迁移的时空分布特征[J]. 环境科学, 2006, 27(8): 1671-1675.
WANG Peng, GAO Chao, YAO Qi, et al. Temporal and spatial distribu-

- tion characteristics of nitrogen losses in hilly area of Taihu Lake[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(8):1671-1675.
- [6] 杨金玲, 张甘霖, 张 华, 等. 丘陵地区流域土地利用对氮素径流输出的影响[J]. 环境科学, 2003, 24(1):16-23.
- YANG Jin-ling, ZHANG Gan-lin, ZHANG Hua, et al. The impact of land uses on watershed runoff nitrogen discharge in hilly regions[J]. *Environmental Science*, 2003, 24(1):16-23.
- [7] Barton A P, Fullen M, Mitchell D J, et al. Effects of soil conservation measures on erosion rates and crop productivity on subtropical Ultisols in Yunnan Province[J]. *China, Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2004, 104(2):343-357.
- [8] 黄满向, 章 申, 唐以剑, 等. 模拟降雨条件下农田径流中氮的流失过程[J]. 土壤与环境, 2001, 10(1):6-10.
- HUANG Man-xiang, ZHANG Shen, TANG Yi-jian, et al. Nitrogen losses from farm runoff under simulated rainfall conditions[J]. *Soil and Environmental Science*, 2001, 10(1):6-10.
- [9] 于兴修, 杨桂山, 梁 涛. 西苕溪流域土地利用对氮素径流流失过程的影响[J]. 农业环境保护, 2002, 21(5):424-427.
- YU Xing-xiu, YANG Gui-shan, LIANG Tao. Effects of land use in Xitiaoqi catchment on nitrogen losses from runoff[J]. *Agro-Environmental Protection*, 2002, 21(5):424-427.
- [10] 李定强, 王继增, 万洪富, 等. 广东省东江流域典型小流域非点源污染物流失规律研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学, 1998, 4(3):12-18.
- LI Ding-qiang, WANG Ji-zeng, WAN Hong-fu, et al. Law of non-point source pollutants losses in a typical small watershed of Dongjiang drainage basin of Guangdong Province[J]. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservatio*, 1998, 4(3):12-18.
- [11] 郝华芳, 程红光, 杨胜天. 非点源污染模型-理论方法与应用[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006:42.
- HAO Hua-fang, CHENG Hong-guang, YANG Sheng-tian. Non-point source pollution model[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2006:42.
- [12] 王 鹏, 高 超, 姚 琪, 等. 环太湖丘陵地区农田氮素随地表径流输出特征[J]. 农村生态环境, 2005, 21(2):46-49.
- WANG Peng, GAO Chao, YAO Qi, et al. Nitrogen losses with surface runoff from farmlands in hilly areas around Tai Lake[J]. *Rural Eco-Environment*, 2005, 21(2):46-49.
- [13] 梁 涛, 张秀梅, 章 申, 等. 西苕溪流域不同土地类型下氮元素输移过程[J]. 地理学报, 2002, 57(4):389-396.
- LIANG Tao, ZHANG Xiu-mei, ZHANG Shen, et al. Nitrogen elements transferring processes and fluxes under different land use in west Tiaoqi catchment[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(4):389-396.
- [14] 黄金良, 洪华生, 张璐平, 等. 九龙江流域典型汇水区地表径流氮磷流失特征分析[J]. 农村生态环境, 2004, 20(3):37-41.
- HUANG Jin-liang, HONG Hua-sheng, ZHANG Luo-ping, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus losses with surface runoff in typical sub-watersheds of Jiulong River watershed[J]. *Rural Eco-Environment*, 2004, 20(3):37-41.
- [15] 冯绍元, 郑耀泉. 农田氮素的转化与损失及其对水环境的影响[J]. 农业环境保护, 1996, 15(6):277-279.
- FENG Shao-yuan, ZHENG Yao-quan. Effects of transformation and losses of farmland nitrogen on water environment[J]. *Agro-Environmental Protection*, 1996, 15(6):277-279.